

Paweł DROŹDZIEL¹
Leszek KRZYWONOS¹
Grzegorz WINIARSKI¹

WYKORZYSTANIE SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH DO ANALIZY WARUNKÓW UŻYTKOWANIA POJAZDU ORAZ ROZRUCHU SILNIKA SPALINOWEGO

Niniejszy artykuł prezentuje wyniki analizy danych uzyskanych w trakcie badań przebiegowych pojazdu dostawczego, przeprowadzonej przy pomocy sztucznych sieci neuronowych. Celem analizy było określenie związków pomiędzy warunkami użytkowania pojazdu a parametrami rozruchu jego silnika spalinowego. Sieci neuronowe wykorzystano również do próby klasyfikacji rozruchów silnika o zapłonie samoczynnym na podstawie kryterium temperatury rozruchu.

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN THE ANALYSIS OF THE CONDITIONS OF VEHICLE USE AND COMBUSTION ENGINE START-UP

The present article discusses the results of an analysis of data obtained during distance tests of a delivery vehicle, conducted with the use of artificial neural networks. The aim of the analysis was to determine the relationship between the conditions of vehicle use and the parameters of its combustion engine start-up. Neural networks were also used in an attempt to classify compression ignition engine start-ups according to the criterion of start-up temperature.

1. WSTĘP

Badania przebiegowe (trakcyjne) pojazdów przeprowadza się w celu poznania rzeczywistych warunków użytkowania samochodów oraz silników zastosowanych do ich napędu [3,4]. Zebrane w ten sposób informacje są przydatne dla zarówno dla projektantów i producentów, jak i dla użytkowników. Pozwalają na określenie faktycznych obciążeń poszczególnych części, zespołów i układów, ocenę negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne, komfortu i bezpieczeństwa człowieka podczas jazdy oraz optymalizację i poprawę ekonomicznej efektywności systemów transportu samochodowego [1].

Niniejszy artykuł prezentuje wyniki badań trakcyjnych pojazdu dostawczego LUBLIN. Celem wykonanych analiz było określenie związków pomiędzy warunkami użytkowania

¹Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny; Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, 20-618 Lublin; ul. Nadbystrzycka 36. Tel: + 48 81 53-84-190, Tel/Fax: + 48 81 53-84-200
E-mail: p.drozdziel@pollub.pl; l.krzywonos@pollub.pl; grzegorzwiniarski@o2.pl

pojazdu oraz parametrami rozruchu jego silnika, a także sprawdzenie możliwości określenia temperatury rozruchu silnika na podstawie innych parametrów rozruchu.

2. BADANIA PRZEBIEGOWE POJAZDU

Badaniami objęto samochód LUBLIN eksploatowany przez Poczta Polską w Lublinie, wyposażony w silnik wysokoprężny 4CT90 o wtrysku pośrednim, produkowany przez Wytwórnię Silników Wysokoprężnych „Andoria” w Andrychowie. Silnik 4CT90 charakteryzuje się pojemnością skokową 2,417 dm³, posiada moc 63,5 kW przy 4100 obr/min i rozwija moment maksymalny 195 Nm przy 2500 obr/min. W badanym pojeździe zainstalowano specjalne urządzenie do pomiaru i rejestracji między innymi: wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik, wartości napięcia na zaciskach rozrusznika, liczby obrotów wału korbowego silnika, liczby obrotów wału napędowego pojazdu, wartości temperatury oleju smarującego i płynu chłodzącego. Pomiar wartości temperatury oleju smarującego i cieczy chłodzącej silnik, liczby obrotów wału korbowego silnika oraz wału napędowego pojazdu odbywały się częstotliwością 1 Hz. Wartości natężenia prądu pobieranego przez rozrusznik oraz napięcia na jego zaciskach mierzono od chwili rozpoczęcia rozruchu z częstotliwością 500 Hz [2].

Mierzone parametry można rozdzielić na dwie grupy. Pierwszą grupę tworzy zbiór parametrów opisujących warunki użytkowania badanego pojazdu:

- X_{Ipra} – czas działania silnika przed kolejnym rozruchem,
- X_{Ipos} – czas postoju samochodu z wyłączonym silnikiem przed rozruchem,
- X_{Itl} – droga tłoka silnika przed kolejnym rozruchem,
- X_{Ipoj} – droga wykonana przez pojazd przed kolejnym rozruchem silnika,
- X_{Tpt} – temperatura silnika (płynu chłodzącego) w chwili rozruchu,
- X_{Tot} – temperatura oleju silnikowego w chwili rozruchu,

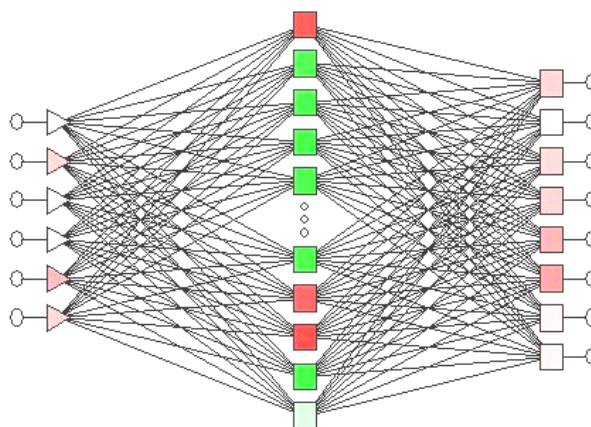
Drugą grupę tworzy zbiór parametrów związanych z rozruchem silnika:

- X_{Imax} – maksymalna wartość prądu pobieranego przez rozrusznik na początku rozruchu silnika,
- X_{Umax} – napięcie przy maksymalnym natężeniu prądu,
- X_{Pmax} – moc elektryczna przy maksymalnym natężeniu prądu,
- $X_{I\acute{s}r}$ – średnie natężenie prądu pobieranego przez rozrusznik podczas napędzania wału korbowego silnika spalinowego,
- $X_{U\acute{s}r}$ – napięcie podczas napędzania wału korbowego silnika,
- $X_{P\acute{s}r}$ – moc elektryczna podczas napędzania wału korbowego silnika,
- X_{Iprzyl} – czas przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika,
- X_{troz} – czas rozruchu silnika.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ SIECIAMI NEURONOWYMI

Uzyskane w trakcie badań przebiegowych wyniki poddano analizie regresji przy pomocy sztucznych sieci neuronowych. Wyniki tej analizy wykazały, że sieć z pojedynczą warstwą ukrytą typu MLP 6:6-12-8:8 (gdzie: MLP – wielowarstwowa sieć perceptronowa) „najlepiej” rozwiązuje problem regresji pomiędzy parametrami opisującymi **warunki użytkowania pojazdu** (zmiennie „wejściowe”) a parametrami **rozruchu** jego **silnika** (zmiennie „wyjściowe”). Schemat tej sieci przedstawiono na rysunku 1. Największą rangą

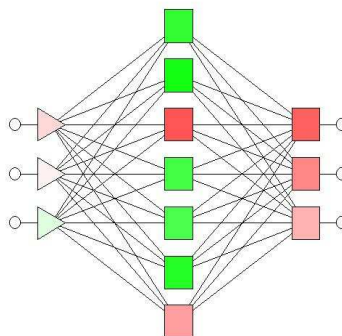
charakteryzowała się zmienna X_{Tpt} , związana z temperaturą silnika w chwili rozruchu. W następnej kolejności były: czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem X_{tpos} , droga pojazdu X_{ipoj} , temperatura oleju w chwili rozruchu X_{Tot} , czas nieprzerwanego działania silnika X_{ipra} oraz droga tłoka X_{lit} . Wartość błędu testowania dla sieci MLP 6:6-13-8:8 wyniosła 0,1183, co znacznie przekracza 95% poziom ufności. Oznacza to, że ta sieć nie jest w stanie w pełni rozwiązać zagadnienia regresji.



Rys. 1. Sieć neuronowa typu MLP 6:6-12-8:8; 6 wejścia oraz 6 wyjścia, 12 neuronów w pojedynczej warstwie ukrytej

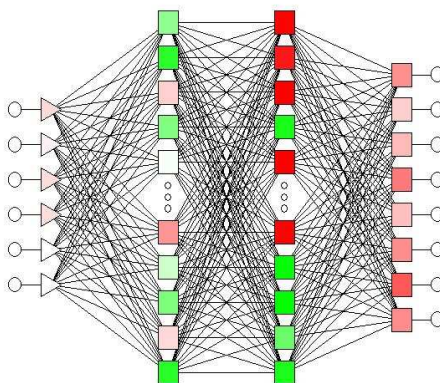
W celu sprawdzenia czy brak poprawnego rozwiązania problemu regresji przy zastosowaniu sieci z pojedynczą warstwą ukrytą wynikał z występujących współzależności, redundancji oraz wymiarowości, ograniczono liczby zmiennych w zbiorach „wejściowym” i „wyjściowym”. Nowy zbiór zmiennych „wejściowych” zawierał: czas nieprzerwanego działania X_{ipra} , czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem X_{tpos} oraz temperaturę silnika w chwili rozruchu X_{Tpt} . Nowy zbiór zmiennych „wyjściowych” obejmował: „prąd rozruchu” X_{Isr} , czas przyłożenia napięcia na zaciski rozrusznika X_{iprzyt} oraz czas rozruchu X_{troz} .

Wyniki przeprowadzonej analizy wykazały, że wartość błędu testowania dla sieci typu MLP 3:3-7-3:3 wynosi 0,1212, co także przekracza 95% poziom ufności. W tej sieci największą rangą charakteryzuje się zmienna związana z czasem postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem X_{tpos} . W następnej kolejności występuje czas pracy silnika X_{ipra} oraz jego temperatura w chwili rozruchu X_{Tpt} . Na rysunku 2 przedstawiono schemat sieci typu MLP 3:3-7-3:3 z pojedynczą warstwą ukrytą, która najlepiej opisała problem regresji przy ograniczonej liczbie parametrów.



Rys.2. Sieć neuronowa typu MLP 3:3-7-3:3; 3 wejścia oraz 3 wyjścia, 7 neuronów w pojedynczej warstwie ukrytej [2]

W celu zwiększenia dokładności analizy regresji zastosowano sieci neuronowe o dwóch warstwach ukrytych, co umożliwi lepsze dopasowanie się sieci do analizowanych wyników. Wyniki analizy regresji wykazały, że błąd testowania dla sieci typu MLP 6:6-13-12-8:8 spada i wynosi 0,0916. Schemat tej sieci przedstawiono na rysunku 3.

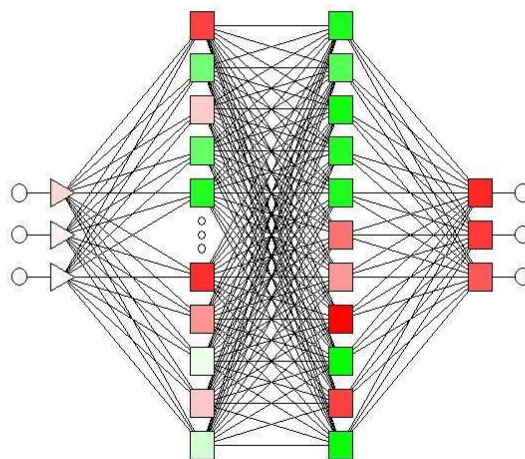


Rys. 3. Sieć neuronowa typu MLP 6:6-13-12-8:8; 6 wejścia oraz 8 wyjścia, 13 neuronów w pierwszej warstwie ukrytej i 12 neuronów w drugiej warstwie ukrytej [2]

Dla sieci MLP 6:6-13-12-8:8 największą rangą charakteryzuje się zmienna związana z temperaturą silnika w chwili rozruchu X_{Tpt} . W następnej kolejności są: temperatura oleju w chwili rozruchu X_{Tol} , czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem X_{tpos} , droga tłka X_{lit} , czas pracy silnika X_{tpra} oraz droga tłka X_{lit} [2].

Zastosowanie sieci neuronowych z dwoma warstwami ukrytymi dla ograniczonego zbioru zmiennych wejściowych i wyjściowych wykazało spadek błędu testowania. Dla sieci MLP 3:3-12-11-3:3, zaprezentowanej na rysunku 4, wynosi już on tylko 0,0823. Wartość ta wskazuje, że tę sieć można wykorzystać do rozwiązania problemu regresji na poziomie

ufności uzyskiwanych wyników równym 90%. Kolejność rang parametrów w sieci MLP 3:3-12-11-3:3 jest następująca: czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem X_{ipos} , czas pracy silnika X_{ipra} oraz temperatura silnika w chwili rozruchu X_{Tpt} .



Rys. 4. Sieć neuronowa typu MLP 3:3-12-11-3:3; 3 wejścia oraz 3 wyjścia, 12 neuronów w pierwszej warstwie ukrytej i 11 neuronów w drugiej warstwie ukrytej

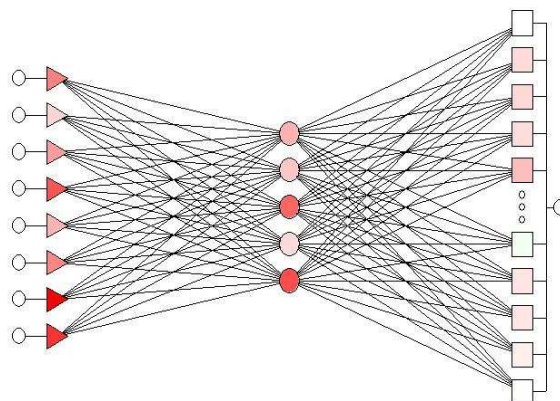
Sztuczne sieci neuronowe wykorzystano również do rozpoznawania temperatury rozruchu silnika pojazdu LUBLIN. Sprawdzono, czy sieć neuronowa jest w stanie sklasyfikować „temperaturowo” przypadek pojedynczego rozruchu, czyli czy jest w stanie rozróżnić rozruch „ciepły”, „chłodny” i „gorący”. Przy czym rozruch silnika o zapłonie samoczynnym nazywamy „gorącym” wtedy, gdy przed przyłożeniem napięcia na zaciski rozrusznika nie występuje konieczność użycia urządzenia ułatwiającego rozruch (świeca żarowa, płomieniowa itd.). Najczęściej temperatura silnika wynosi wtedy powyżej 60 °C. Rozruch „ciepły” występuje wtedy, kiedy temperatura silnika zawiera się w granicach (20 ÷ 60) °C. Poniżej temperatury 20 °C rozruch silnika nazywamy „chłodnym” [2].

W pierwszym etapie klasyfikacji wzięto pod uwagę tylko parametry bezpośrednio związane z rozruchem silnika 4CT90. Wyniki analizy klasyfikacyjnej przedstawiono w tabeli 1. Na podstawie uzyskanych wyników należy stwierdzić, że żadna z sieci prezentowanych w tabeli 1 nie jest w stanie właściwie zaklasyfikować przypadku pojedynczego rozruchu silnika 4CT90 do właściwej grupy temperaturowej. Wartość błędu testowania danych typów sieci znacznie przekracza 95% poziom ufności. Nawet sieć neuronowa, w której wzięto pod uwagę wszystkie parametry związane z rozruchem badanego silnika 4CT90, nie jest w stanie właściwie zaklasyfikować „temperaturowo” pojedynczy rozruch. Należy także zwrócić uwagę, że sieci neuronowe z dwiema warstwami ukrytymi posiadają większe wartości błędu testowania.

Tab. 1. Wyniki rozpoznawania temperatury rozruchu na podstawie parametrów związanych z rozruchem silnika 4CT90 samochodu LUBLIN przez sieci neuronowe

Parametry brane jako zmienne wejściowe	Sieci „najlepsze”		Sieci z dwiema warstwami ukrytymi	
	Typ sieci	Błąd testowania	Typ sieci	Błąd testowania
X_{Imax}	Liniowa 1:1-3:1	0,2963	MLP 1:1-11-11-3:1	0,7778
X_{Umax}	RBF 1:1-3-3:1	0,3249	MLP 1:1-11-11-3:1	0,6504
X_{Pmax}	RBF 1:1-3-3:1	0,2894	MLP 1:1-11-11-3:1	0,6317
$X_{I\dot{s}r}$	RBF 1:1-5-3:1	0,3190	MLP 1:1-11-11-3:1	0,6589
$X_{U\dot{s}r}$	RBF 1:1-5-3:1	0,3144	MLP 1:1-11-11-3:1	0,7089
$X_{P\dot{s}r}$	RBF 1:1-11-3:1	0,2887	MLP 1:1-11-11-3:1	0,8361
$X_{i\dot{p}rzyt}$	RBF 1:1-12-3:1	0,2371	MLP 1:1-11-11-3:1	0,5150
X_{troz}	RBF 1:1-6-3:1	0,3740	MLP 1:1-11-10-3:1	0,8124
$X_{I\dot{s}r}, X_{i\dot{p}rzyt}$	RBF 2:2-5-3:1	0,2175	MLP 2:2-8-8-3:1	0,9539
$X_{I\dot{s}r}, X_{troz}$	RBF 2:2-5-3:1	0,2900	MLP 2:2-10-10-3:1	0,6449
$X_{P\dot{s}r}, X_{troz}$	RBF 2:2-11-3:1	0,2213	MLP 2:2-6-5-3:1	0,7665
$X_{i\dot{p}rzyt}, X_{troz}$	RBF 2:2-12-3:1	0,2230	MLP 2:2-11-11-3:1	0,6307
$X_{Imax}, X_{Umax}, X_{Pmax}$	RBF 3:3-12-3:1	0,2696	MLP 3:3-11-11-3:1	0,6915
$X_{I\dot{s}r}, X_{U\dot{s}r}, X_{P\dot{s}r}$	RBF 3:3-11-3:1	0,2168	MLP 2:2-11-5-3:1	0,8775
$X_{Imax}, X_{Umax}, X_{Pmax}, X_{I\dot{s}r}, X_{U\dot{s}r}, X_{P\dot{s}r}, X_{i\dot{p}rzyt}, X_{troz}$	RBF 8:8-5-43:1	0,1469	MLP 4:4-11-11-3:1	0,5897

Najczęściej proponowanym typem sieci jest sieć o radialnych funkcjach bazowych (RBF). W dwuelementowym zbiorze ($X_{I\dot{s}r}, X_{i\dot{p}rzyt}$) zmiennych wejściowych największą rangę ma zmienna $X_{i\dot{p}rzyt}$. W zbiorze ($X_{I\dot{s}r}, X_{troz}$) przeważa $X_{I\dot{s}r}$ względem X_{troz} , zaś w zbiorze ($X_{P\dot{s}r}, X_{troz}$) większą rangą charakteryzuje się zmienna $X_{P\dot{s}r}$. W zbiorze zmiennych związanych z oporami początkowymi kolejność pod względem ważności jest następująca: $X_{Umax}, X_{Imax}, X_{Pmax}$. W zbiorze zmiennych związanych z uruchamianiem silnika kolejność jest podobna: $X_{U\dot{s}r}, X_{I\dot{s}r}, X_{P\dot{s}r}$. W zbiorze wszystkich parametrów największą rangę ma $X_{i\dot{p}rzyt}$, w następnej kolejności są: $X_{troz}, X_{I\dot{s}r}, X_{U\dot{s}r}, X_{Pmax}, X_{P\dot{s}r}, X_{Umax}, X_{Imax}$. Na rysunku 5 przedstawiono sieć typu RBF najlepiej rozpoznającą temperaturę rozruchu silnika 4CT90, w której danymi wejściowymi są wszystkie parametry związane z jego rozruchem [2].



Rys. 5. Sieć neuronowa typu RBF 8:8-5-43:1; osiem wejść oraz 1 wyjście, 5 neuronów w warstwie ukrytej [2]

Przeprowadzono również próbę rozpoznawania temperatury rozruchu na podstawie zbioru parametrów związanych z warunkami użytkowania pojazdu LUBLIN. Wyniki tej analizy przedstawiono w tabeli 2.

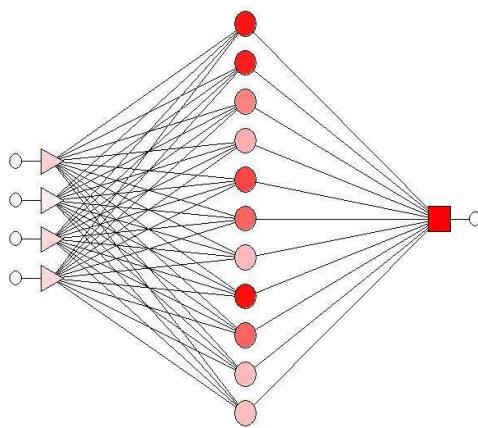
Tab. 2. Wyniki rozpoznawania temperatury rozruchu na podstawie parametrów związanych z warunkami użytkowania samochodu LUBLIN przez sieci neuronowe

Parametry brane jako zmienne wejściowe	Sieci „najlepsze”		Sieci z dwiema warstwami ukrytymi	
	Typ sieci	Błąd testowania	Typ sieci	Błąd testowania
X_{ipra}	RBF 1:1-2-3:1	0,3453	MLP 1:1-10-10-1:1	0,5112
X_{ipos}	RBF 1:1-11-1:1	0,3156	MLP 1:1-10-10-1:1	0,4605
X_{iht}	RBF 1:1-11-1:1	0,3570	MLP 1:1-10-10-1:1	0,5411
X_{ipoj}	RBF 1:1-35-1:1	0,3801	MLP 1:1-10-10-1:1	0,6538
X_{ipra} i X_{ipos}	RBF 2:2-15-1:1	0,2744	MLP 2:2-10-6-1:1	0,5094
X_{ipra} i X_{iht}	RBF 2:2-5-1:1	0,3891	MLP 2:2-10-5-1:1	0,5903
X_{ipra} i X_{ipoj}	RBF 2:2-23-1:1	0,3378	MLP 2:2-10-9-1:1	0,4336
X_{ipra} , X_{ipoj} , X_{iht} , X_{ipos}	RBF 4:4-11-1:1	0,2943	MLP 4:4-10-8-1:1	0,7030

Omawiając wyniki zaprezentowane w tabeli 2 należy ponownie stwierdzić, że żadna z sieci neuronowych, wykorzystujących podczas analizy parametry związane z warunkami użytkowania pojazdu LUBLIN, nie jest w stanie poprawnie zaklasyfikować pojedynczego rozruchu silnika 4CT90 do właściwej grupy określającej jego temperaturę, nawet wówczas, gdy podczas budowy sieci neuronowej wzięto pod uwagę wszystkie parametry. Wartość błędu testowania zaprezentowanych typów sieci RBF znacznie przekracza 95% poziom ufności.

Można jedynie stwierdzić, że w zbiorze zmiennych wejściowych (X_{ipra} , X_{lit}) większą rangą charakteryzuje się zmienna X_{ipra} , w zbiorze zmiennych (X_{ipra} , X_{ipos}) największą rangę ma czas postoju pojazdu z wyłącznym silnikiem X_{ipos} , w zbiorze (X_{ipra} , X_{ipoj}) — zmienna X_{ipra} . Spośród wszystkich zmiennych najistotniejszy wkład wnosi czas postoju pojazdu z wyłączonym silnikiem X_{ipos} . Kolejnymi zmiennymi pod względem ważności rangi są: X_{ipoj} , X_{ipra} , X_{lit} .

Na rysunku 6 przedstawiono najlepiej klasyfikującą sieć typu RBF operującą na wszystkich parametrach związanych z warunkami użytkowania pojazdu LUBLIN.



Rys. 6. Sieć neuronowa typu RBF 4:4-11-1:1; 4 wejścia, 1 wyjście oraz 11 neuronów w warstwie ukrytej

3. WNIOSKI

Wyniki analiz przeprowadzonych przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych potwierdzają fakt, że stan cieplny silnika spalinowego (opisywany przez temperaturę płynu chłodzącego oraz oleju silnikowego) jest decydującym czynnikiem przebiegu rozruchu silnika 4CT90 samochodu LUBLIN.

Zebrane dane eksploatacyjne okazały się niewystarczające do znalezienia sieci neuronowej efektywnie rozpoznającej temperaturę rozruchu silnika.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Čorejová T., Madleňáková L.: *Some remarks to postal service quality*, 11th International Scientific Conference: Communications on the Edge of the Millenniums. Žilina, Slovak Republic, 2003, str. 27-30.
- [2] Drożdziel P.: *Widmo rozruchu silnika o zapłonie samoczynnym jako kryterium oceny warunków użytkowania samochodu*, Warszawa, Wydawnictwo PNTTE, 2009.
- [3] Hlavná V., Kukuča P., Isteník R., Labuda R., Liščák Š.: *Dopravný prostriedok jeho motor*, Žilina, Slovak Republic, EDIS- Žilina University publisher 2000.
- [4] Smalko Z.: *Podstawy eksploatacji technicznej pojazdów*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1998.